

原 著

正常者，喉頭麻痺患者における喉頭ストロボスコープ所見の定量的評価

中川伸一，小池靖夫，大山 玄，中村克彦，幸田純治，
阿部晃治，増田博範

徳島大学医学部耳鼻咽喉科学教室（主任：小池靖夫教授）

（平成10年9月1日受付）

正常者，喉頭麻痺患者の喉頭所見を定量的に評価するコンピューターシステムを紹介した。対象は正常者10例，喉頭麻痺患者10例（正中位固定5例，副正中位固定5例）とし，音声資料として，楽な高さ楽な強さの持続母音/e/を使用した。声門面積はデジタル化した喉頭ストロボスコープ画像を測定し，声帯長の2乗で標準化し，平均声門面積は標準化声門面積の最大値最小値平均と定義された。喉頭麻痺患者では平均声門面積は声帯位が正中から開大するほど大きくなった。さらに，声帯振動の観察法について文献的考察を行い，喉頭ストロボスコープが臨床的に最も有用な検査法であることが示された。

発声障害のある患者を診断・治療し，その効果を判定する際に重要なことは，病変部の観察をできるだけ客観的に評価することである。しかし，発声時の声帯振動は100~200Hz以上であり，肉眼で見えることはできない。声帯振動を可視化するにはいろいろな方法があるが，その中でも喉頭ストロボスコープは欠かすことのできない臨床的検査法の一つである。少なくとも現在では，声帯振動の観察をする他の方法よりも，臨床的にははるかに重要である。しかし，喉頭ストロボスコープの画像は視覚的運動像であり，従来その評価に主観的要素が入ってきたことも否めない。そこで，今回，喉頭ストロボスコープの所見を客観的に撮像記録し，コンピューターによる画像処理システムを用いて定量的に評価することを試みた。また，喉頭ストロボスコープなど声帯振動の検査法一般と，その画像処理についても若干の文献的考察を行った。

対象とシステム

対象は発声障害のない正常者10名，一側喉頭麻痺患者

10名（正中位固定5名，副正中位固定5名）の計20名である。

音声資料として楽な強さ楽な高さ/e/を数秒間持続発声させたものを用いた。

画像処理システムを図1に示す。町田製作所製・直達喉頭鏡LY-C30に，永島社製喉頭ストロボスコープLS-3Aを用いて声帯振動を観察し，ビデオ録画した。ビデオ録画した画像の中で，必要な画像を選びプリントし，エプソン社製GT-6000スキャナーでマッキントッシュ（Power Macintosh G3[®]）にデジタル化し取り込んだ。そのコンピューター画面上で画像解析ソフトウェアNIH imageを用いてそれぞれの画像の声帯長，声門面積を求めた。

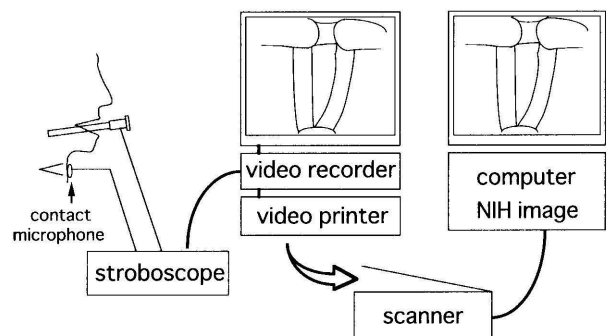
検討項目

検討項目を以下に示す。

- 1) 声門面積については，声帯から直達喉頭鏡までの距離が一定しないため絶対値で求めるのは困難である。

図1 画像処理システムについて

喉頭ストロボスコープの画像解析システム



そこでコンピューター画面上で声門面積と発声時声帯長を計測し(単位はピクセル), 声門面積を発声時声帯長の2乗で除したものを標準化声門面積として定義した。

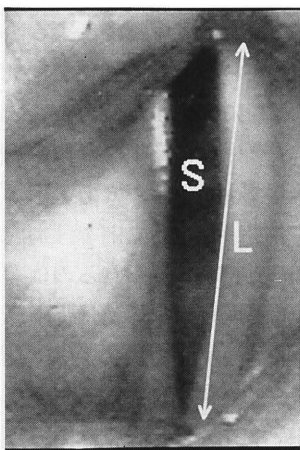
- 2) 喉頭ストロボスコープで観察される声帯振動像を標準化声門面積の時間波形として表現する。これにより, 声門の閉鎖不全, 声門閉鎖期などについての情報が定量的に求める。
- 3) 平均声門面積というのは声門面積の時間波形を求め, それより平均声門面積を得るのが適当である。しかし, それには時間と手間が多くかかる。そこで, 簡便にかつ定量的に平均声門面積の大きさを評価するために, 声門面積の時間波形から求めた平均声門面積と最大声門面積と最小声門面積から求めた平均声門面積との関係を比較検討する(対象は正常者10名, 一側喉頭麻痺患者10名の計20名)。
- 4) 声帯位と平均声門面積について検討する。

結 果

検討項目に沿って結果を示す。

- 1) 喉頭ストロボスコープの画像所見をコンピューター解析した例を示す(図2)。症例は45歳女性, 左喉頭麻痺(副正中位固定)患者である。発声時声帯長は90ピクセル, 声門面積は1290ピクセルで, 標準化声門面積は $1290/90^2=0.16$ となる。
- 2) コンピューターに取り込んだ喉頭ストロボスコープ画像(図3-a [正常者], 図4-a [左喉頭麻痺患者])の1コマごとの標準化声門面積を計算し, 標準化声

図2 喉頭ストロボスコープの画像所見をコンピューター解析した1例



画像処理した1例

症例; 左喉頭麻痺, 45歳女性

声門面積; S=1290pixel
声帯長; L=90pixel

標準化した声門面積の大きさ

$$; \frac{S}{L^2} = 0.16$$

図3-a 正常者のストロボによる声帯振動

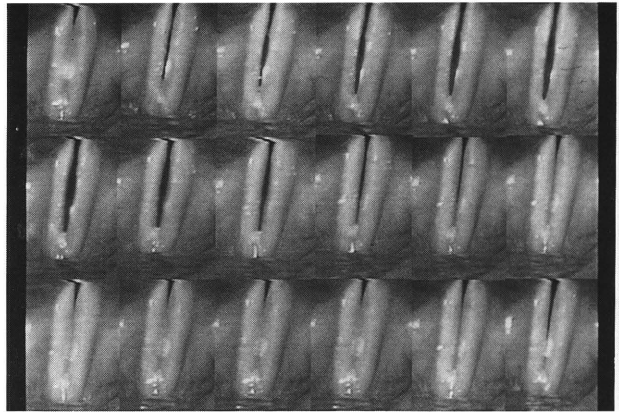
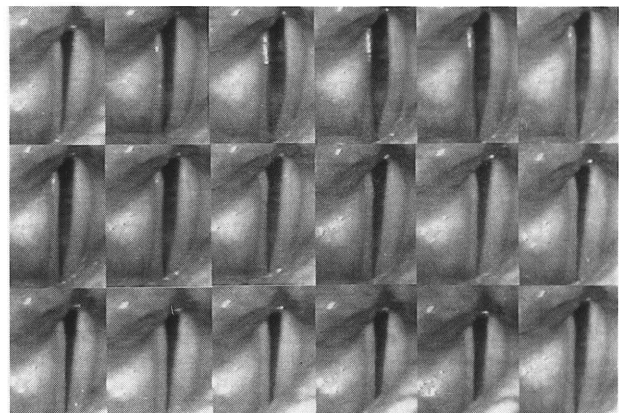


図4-a 喉頭麻痺患者(図2の症例)のストロボによる声帯振動



門面積の時間波形を求めた(図3-b, 図4-b)。

左喉頭麻痺患者では標準化声門面積の最小値が0.07, 正常者では0であり, 左喉頭麻痺患者では声門閉鎖不全があることも定量的に示された。また, 一側喉頭麻痺患者では声門閉鎖期がなく, 正常者では4コマあることがわかる。

- 3) 声門面積波形より求めた平均声門面積と最大値最小値平均との関係(図5)は, ほぼ正比例で相関係数 $r=0.95$ を示した。つまり, 正常者, 喉頭麻痺患者の平均の声門面積の大きさを求めるのに最大値最小値平均を用いて近似しても良いと考えられた。
- 4) 正常者及び喉頭麻痺患者の声帯位別の(最大声門面積と最小声門面積から求めた)平均声門面積について(図6)は, 正常者 $0.043(\pm 0.008)$, 正中位 $0.076(\pm 0.042)$, 副正中位 $0.140(\pm 0.012)$ であった。喉頭麻痺群では声帯位が正中から開大すると平均声門面積は大きくなることが定量的に示された。正常

図3-b 図3-aの標準化声門面積波形

標準化声門面積

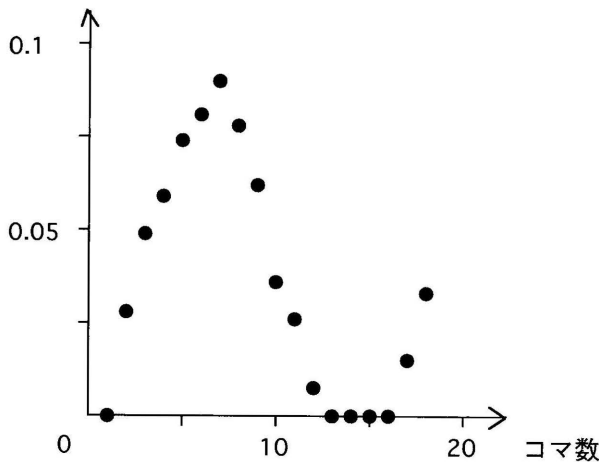


図4-b 図4-aの標準化声門面積波形

標準化声門面積

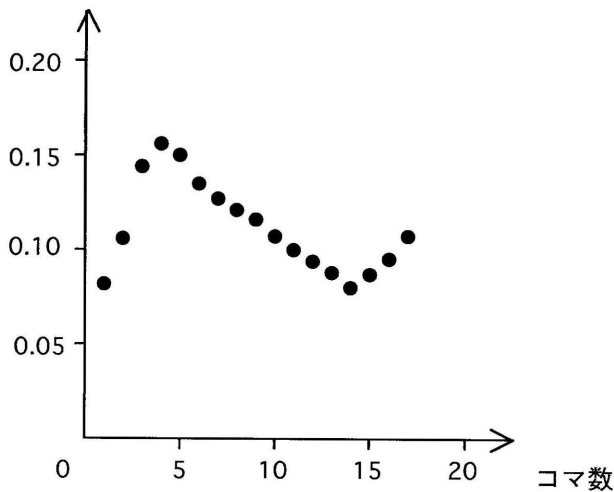


図5 標準化声門面積波形より求めた平均声門面積と最大値最小値平均との関係

最大値最小値からの平均声門面積

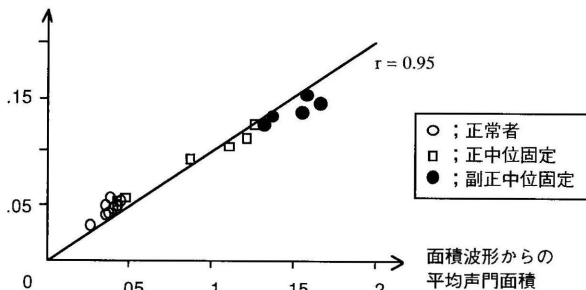
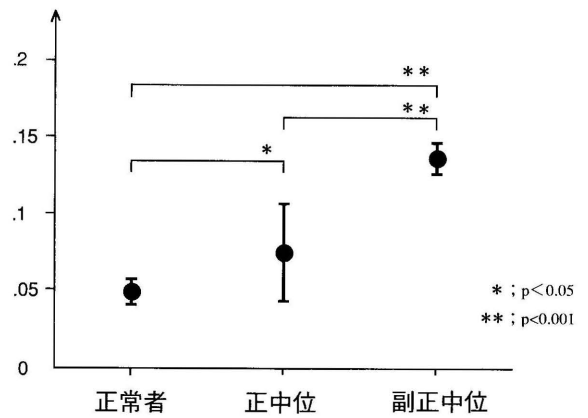


図6 正常者及び喉頭麻痺患者の声帯位別の平均声門面積について

声帯位と平均声門面積

平均声門面積



者、正中位固定、副正中位固定の平均声門面積についてお互いに有意差を認めた。

なお、これらの結果の統計学的検討にはANOVA検定を用い、 $P < 0.05$ を有意な差とした。

考 察

発声時の声帯振動の基本周波数は100Hzから時に1000Hzに達し、個々の声帯振動を肉眼で直接見ることはできない。しかし、声帯の振動状態を観測することは非常に重要であり、その振動像を可視化するための方法がいろいろと開発されている。それらは、間接的観測法と直接的観測法に大別される。

間接的観測法には光電グロトグラフィ、電気グロトグラフィ、超音波グロトグラフィ等がある。光電グロトグラフィは、声門の上方あるいは下方に直流電源による照明光を入れ、声門面積に応じて変わる光量の変化を電気信号としてとり出し、時間とともに変化する波形として記録する装置である。この方法を生体に応用し、声帯振動の様子をとらえ解析したのはSonesson¹⁻³⁾である。これにより、声門の開大期、閉小期、閉鎖期などを区別することができる。しかし、この検査から得られるのは声門面積の相対的な変化であって、面積の絶対値は得られない。また、照明光や受光素子との位置関係によって、出力が変動しやすい欠点がある。電気グロトグラフィは、左右の甲状軟骨板外側の皮膚面に電極をおいて高周波電

流を流しておき、声門の開閉によって生じる電氣的インピーダンスの変化を検出記録するものである。この検査方法は Fabre⁴⁾によって開発され、追試・改良された。喉頭ストロボスコープでは得られない声門閉鎖中の情報が得られる。また、非侵襲であることも大きな特徴である。超音波グロトグラフィは、甲状軟骨板上の声帯の高さで皮膚に超音波用探触子を当て、超音波パルスを入射し、声帯組織と空気との境界である声帯縁で反射される反射波を記録する検査法である。これにより、両側声帯の接触面積の変化をとらえることができると言われている⁵⁾。超音波グロトグラフィでは声帯の水平方向の運動だけでなく、垂直方向の運動も検討することができる。しかし、反射波が声帯縁のどの部位の運動を示しているのかなど、十分に明らかになっていない。これらの間接的観測法については、まだ十分にわかっていない点もあり、一般臨床で用いられるには至っていない。

直接的観測法には高速度映画、フォトキモグラフィ、高速度デジタル撮影方式、喉頭ストロボスコープがある。1940年代に米国の Bell 研究所において、Fransworth⁶⁾によりはじめて高速度映画を用いた声帯振動の観察が行われた。その後、我が国でも平野ら⁷⁾多くの研究者により、高速度映画が利用され、声帯振動の解析には最も有用な検査法の1つであることが示された。高速度映画では1秒あたりのコマ数を数千コマで撮影することにより、声帯振動の1サイクルを数十コマとし、正確な声帯振動をスローモーションで観測することができる。しかし、撮影されたフィルムの画像の処理に多くの時間と労力を必要とするので、臨床で用いられることはなく、主に研究用で用いられている。フォトキモグラフィは Gall ら⁸⁾によって報告されている声帯振動の写真記録法である。喉頭撮影用のカメラに特殊なスリットシャッターを取り付けたもので撮影を行う。これにより、声帯振動の周期、声門閉鎖の状態、振動像の左右差、振動の規則性などがわかるとされている。しかし、声帯像の同一の部分の軌跡はわからないこと、画像の鮮明度にも問題があり、一般的には用いられていない。高速度デジタル撮影方式は原理的には、画像を半導体素子面に結像させ、電子計算機の制御下に高速スキャンし、一画面ごとにデジタル変換しデジタルビデオ信号を得るものである。その信号を記憶装置（デジタルメモリ）に蓄え、これをゆっくりとした速度で再生すれば、高速度映画に近い情報が得られる。今川ら⁹⁾が100×100画素の MOS 撮像素子を用い、経口的に挿入した硬性側視鏡により喉頭画像を撮像する

方法を初めて開発し報告した。これまでの欠点は画面の解像力が悪いことと光量の問題があったことである。最近のシステムでは画素数が256×256画素となって毎秒4500コマの撮影が可能となり解像力も良くなっている。まだ一般臨床で用いられるには少し時間がかかると思われるが、今後とも発展が期待される検査法である。

喉頭ストロボスコープは、ストロボ光の発光のタイミングを発声の基本周期よりわずかにずらすことにより、みかけ上スローモーションの振動像が観察でき、また同じ周期で発光させるとある特定の位相で固定した像が観察できる装置である。初期の喉頭ストロボスコープは、間接喉頭鏡に穴のあいた回転盤を通した光や交流の光を照らす装置で、その煩雑さから一般的には受け入れられなかった¹⁰⁾。1932年に Kallen が初めてストロボスコープの近代的フラッシュ管を開発し¹¹⁾、その後 Timcke¹²⁾など多くの研究者たちが喉頭ストロボスコープの改良と発展を進めてきた。von Leden は声帯癌の早期発見と声帯結節の管理に喉頭ストロボスコープは有用であることを強調し、特に喉頭癌では粘膜下の筋肉に固着した部分は粘膜波動が減少すると述べている¹³⁾。Fex と Elmqvist は反回神経麻痺の患者の声帯では traveling wave が消失すること、神経機能の回復する早期に traveling wave が出現することも報告している^{14, 15)}。今日では喉頭ストロボスコープの臨床的有用性は確立され、最も多く利用されている装置となっている。しかし、喉頭ストロボスコープで観察される振動像はその原理から個々の振動を見ているのではなく多くの振動の積み重なった平均的な振動像を見ているので注意が必要である。また、喉頭ストロボスコープの欠点は声帯振動が非常に不規則な場合、同期がとれなくなり観察不可能となることである。このような特徴を認識した上で行う喉頭ストロボスコープは少なくとも現在では、声帯振動の観察をする他の方法と比べて臨床的に欠かすことのできない検査法になっている。

声帯振動の観察というのは視覚的であり、主観的であるため、声帯振動所見を定量的に評価することが重要である。そこで声門面積、声帯長、声帯幅などの計測するために多くの努力がそそがれてきた。喉頭画像処理の初期は声門面積を計算するためにトレッシングペーパーやデジタルプラニメーターが用いられたこともあった。しかし、トレッシングペーパーは時間と労力が多くかかるし、デジタルプラニメーターでは正確性に欠ける欠点があった。その後、コンピューターの開発・発展とともに、

いろいろな画像解析方法が研究され、1972年に Haydenらは小型コンピューター PDP-8 を用いたシステムを開発し、高速度映画の喉頭像を早く正確かつ定量的に表現することを可能にした¹⁶⁾。今日では CCD カメラ、ビデオシステムの発達もあり、市販のソフトウェアを用いて簡単に画像処理でき、喉頭画像を誰にでも簡便かつ定量的に評価できるようになっている¹⁷⁻²⁰⁾。そこで今回、ビデオ、コンピューターシステムを用いて喉頭所見を定量的に表現し、喉頭ストロボスコープで観察される声門面積の大きさを定量的に評価することを試みた。

声門面積を計測する上での問題点は声門から直達喉頭鏡までの距離が一定ではないため、声門面積の大きさを絶対値で求めるのは難しいことにある。そこで、声帯長を用いてその声門面積の大きさを標準化する方法を用いる^{17,18)}。Woo¹⁷⁾は正常者の声門面積を発声時声帯長で割る方法を用いた。大森ら¹⁸⁾は反回神経麻痺患者の発声時最小となる声門間隙を発声時声帯長の2乗で割ったものを標準化声門間隙として求めた。大森らは反回神経麻痺患者の手術前後で標準化声門間隙が改善していることを定量的に示した。本研究においては発声時の声門面積を発声時の声帯長の2乗で割ったものとして定義した。しかし、声門面積の小さい症例などは誤差が出やすく、症例間の比較が困難である。そこで本研究では声帯位により声門面積の差が大きい喉頭麻痺患者と正常者を対象として選び、声門面積を定量的に評価することを試みた。その結果、正常者、喉頭麻痺患者正中位固定、喉頭麻痺患者副正中位固定での平均声門面積が定量的に評価され、お互いに有意差があることが示された。また、正中位固定より副正中位固定の方が平均声門面積が大きいことも定量的に示すことができた。過去の報告では主に声門間隙の評価として声帯位が用いられてきたが、本研究のように定量的に評価し一定の傾向を得た報告は初めてである。

平均声門面積というのは声門面積の時間波形を求め、それより平均声門面積を得るのが適当である。しかし、それには時間と手間が多くかかる。そこで、今回我々は簡便にかつ定量的に平均声門面積の大きさを評価するために、声門面積の時間波形から求めた平均声門面積と最大声門面積と最小声門面積から求めた平均声門面積との関係を検討した(図5)。その結果、面積波形から求めた平均値と最大声門面積と最小声門面積から求めた平均値は正比例を示した。つまり正常者と喉頭麻痺患者間では平均の声門面積の大きさを最大声門面積と最小声門面

積から求めた平均値で表現できると考えられた。

このように、声門面積の大きさを定量的に評価することにより、他の症例との比較あるいは空気力学的変量、音響学的変量との比較が可能となり、今後の検討課題としたい。

ま と め

1. 声帯振動の観察方法について文献的考察を行い、喉頭ストロボスコープが臨床的に最も有用な検査法の1つであると考えられた。
2. 喉頭所見を客観的に評価するため、コンピューターシステムを用いて声門面積の大きさ、声帯長を定量的に表現する方法を開発した。
3. 正常者、喉頭麻痺患者の喉頭ストロボスコーピーによる標準化声門面積の時間波形を求めた。
4. 標準化声門面積の時間波形から求めた平均声門面積の大きさと最大声門面積と最小声門面積から求めたものは正比例を示し、正常者と喉頭麻痺患者においては平均の声門面積の大きさを最大声門面積と最小声門面積の平均で表現できることが示された。
5. ここで定義した方法で喉頭画像を定量的に評価することにより、喉頭麻痺患者と正常者、喉頭麻痺患者間そして治療前後の比較を行うことができる。今後は音響学的、空気力学的変量と比較検討する予定である。

文 献

- 1) Sonesson, B.: On the anatomy and vibratory pattern of the human vocal folds. Acta Otolaryng., (Suppl.) 156: 1-80, 1960
- 2) Sonesson, B.: Photo-electric demonstration of the vibratory movements of the human vocal folds. In: Speech, Voice Ther. Conf. XII. (Croatto, L. and Croatto, M.C., eds.), 1962, pp. 57-61
- 3) Kitzing, P., and Sonesson, B.: A photoglottographical study of the femal vocal folds during phonation. Folia phoniatr., 26: 138-149, 1974
- 4) Fabre, M.P.: Un procede électrique percutané d'inscription de l'accolement glottique au cours de la phonation: glottographie de haute fréquence. Premiers resultats. Bull. Acad. Nat. Med., 141: 66-69, 1957

- 5) 金子敏郎, 浅野 尚, 三浦徹蔵, 小林伸行: 超音波パルス法による声帯振動の観察法—Ultrasonoglot-tography の現状. 医学のあゆみ, 96 : 511-516, 1976
- 6) Fransworth, D.W.: High-speed motion pictures of human vocal cords. Bell Telephone Record, 18 : 203-208, 1940
- 7) Hirano, M., Yoshida, Y., Matsushita, H., Nakajima, T., et al. : An apparatus for ultra-high-speed cinema-tography of the vocal cords. Ann. Otol. Rhinol. Laryngol., 83 : 12-18, 1974
- 8) Gall, V., and Hansen, J. : Bestimmung physikalischer Parameter der Stimmlippenschwingungen mit Hilfe der Larynxphotokymographie. Folia Phoniatr., 25 : 450-459, 1973
- 9) Imagawa, H., Kiritani, S., and Hirose, H. : Further Development in High-speed Digital Image Recording System for Assessment of Vocal Cord Vibration-with Special Reference to Its Clinical Application-. Ann. Bull. Rilp., 21 : 9-23, 1987
- 10) Alberrti, P.W. : The diagnostic role of laryngeal stroboscopy. Otolarygol. Clin. North Am., 11 : 347-354, 1978
- 11) Padovan, I.F., Christman, N.T., Hamilton, L.H., and Darling, R.J. : Inderect microlaryngostroboscopy. Laryngoscope, 83 : 2035-2041, 1973
- 12) Timcke, R. : Laryngostroboskopie mittels eines neuartigen Synchrostroboskops. HNO., 169 : 539-542, 1956
- 13) von Leden, H. : The electronic synchron-stroboscope. : its value for the practicing laryngologist. Ann. Otol. Rhinol. Laryngol., 70 : 881-893, 1961
- 14) Fex, S., and Elmqvist, D. : Endemic recurrent laryngeal nerve paresis-correlation between EMG and stroboscopic findings-. Acta Otolaryngol (Stockh)., 75 : 368-369, 1973
- 15) Fex, S. : Judging the movements of the vocal cords in larynx paralysis. Acta Otolaryngol (Stockh) ., 263 : 82-83, 1970
- 16) Hayden, E.H., and Koike, Y. : A deta processing scheme for frame by frame film analysis. Folia Phoniatica, 24 : 169-181, 1972
- 17) Woo, P. : Quantification of videostrobolaryngoscopic findings-Measurements of the normal glottal cycle. Laryngoscope, 106 : 1-27, 1996
- 18) Omori, K., Kacker, A., Slavitt, D., and Blaugrund, S. M. : Quantitative videostroboscopic measurement of glottal gap and vocal function—An analysis of thyroplasty type I —. Ann. Otol. Rhinol. Laryngol., 105 : 280-285, 1996
- 19) Sercarz, J.A., Berke, G.S., Arnstein, D., Gerratt, B., et al. : A new technique for quantitative mesurement of laryngeal videostroboscopic images. Arch. Otolaryngol. Head Neck Surg., 117 : 871-875, 1991
- 20) Sercarz, J.A., Berke, G.S., Ming, Y., Gerratt, B., et al. : Videostroboscopy of human vocal fold paralysis. Ann. Otol. Rhinol. Laryngol., 101 : 567-577, 1992

Quantitative evaluation of laryngostroboscopic findings in normal subjects and patients with laryngeal paralysis

Shinichi Nakagawa, Yasuo Koike, Ghen Ohyama, Katsuhiko Nakamura, Junji Koda, Koji Abe, and Hironori Masuda

Department of Otorhinolaryngology, The University of Tokushima School of Medicine, Tokushima

(Director : Yasuo Koike)

SUMMARY

A computer system was introduced for quantitative evaluation of laryngeal images in normal volunteers and laryngeal paralysis patients. The subjects consisted of 10 normal volunteers and 10 patients with unilateral laryngeal paralysis (5 median fixation cases and 5 paramedian fixation cases). For phonatory examination, the sustained vowel /e/ with an easy phonation level was used. A glottal area was measured in digitized laryngeal stroboscopic images and normalized by the square of the vocal fold length. The average glottal area was defined to be as the average of the maximum and the minimum normalized glottal areas. In laryngeal paralysis patients, the average glottal area became larger as the paralyzed vocal fold position deviated from the median. Furthermore, the observation methods for vocal fold vibration was reviewed and discussed. It emphasized that laryngeal stroboscopy was the most useful clinical testing methods.

Key words : laryngealstroboscopy, glottal area, quantitative evaluation, unilateral laryngeal paralysis, review